

重质碳酸钙的生产工艺及应用研究进展

张家宁¹, 王博垚¹, 何航川^{1*}, 王 勇¹, 王光硕^{1,2}, 陈德君², 刘伟强²

¹河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸

²江西广源化工有限责任公司, 江西 吉安

收稿日期: 2025年5月13日; 录用日期: 2025年6月18日; 发布日期: 2025年6月26日

摘 要

碳酸钙根据粉体不同的生产工艺和物理性质, 分为重质碳酸钙和轻质碳酸钙。重质碳酸钙因其广泛的来源、廉价的价格、自身独特的性能已经成为非常重要的无机矿物材料, 广泛地应用于国民经济中的工业、农业和日常生活的各个领域。本文详细介绍了重质碳酸钙的生产过程及其生产中的影响因素, 综述了重质碳酸钙在涂料、橡胶、造纸、塑料中的应用现状, 简要概括了重质碳酸钙的研究展望和发展趋势。

关键词

重质碳酸钙, 生产, 应用, 研究进展

Research Progress on Production and Application of Ground Calcium Carbonate

Jianing Zhang¹, Boyao Wang¹, Hangchuan He^{1*}, Yong Wang¹, Guangshuo Wang^{1,2},
Dejun Chen², Weiqiang Liu²

¹School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Jiangxi Guangyuan Chemical Co. Ltd., Ji'an Jiangxi

Received: May 13th, 2025; accepted: Jun. 18th, 2025; published: Jun. 26th, 2025

Abstract

Calcium carbonate is generally divided into heavy calcium carbonate and light calcium carbonate according to different production processes and physical properties of the powder. Heavy calcium carbonate has become a kind of the most important inorganic mineral materials in modern times due to its wide sources, low price, and unique properties. It is widely used in various fields of industry, agriculture, and daily life in the national economy. This article provides a detailed introduction to

*通讯作者。

文章引用: 张家宁, 王博垚, 何航川, 王勇, 王光硕, 陈德君, 刘伟强. 重质碳酸钙的生产工艺及应用研究进展[J]. 材料科学, 2025, 15(6): 1350-1357. DOI: 10.12677/ms.2025.156143

the production process and influencing factors of heavy calcium carbonate, summarizes the current application status of heavy calcium carbonate in coatings, rubber, papermaking, and plastics, and briefly summarizes the research prospects and development trends of heavy calcium carbonate.

Keywords

Ground Calcium Carbonate, Production, Application, Research Progress

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

将天然方解石、小解石等矿物作为原材料,经过破碎、研磨、分级后,加工到一定粒度大小可以得到重质碳酸钙。由于其具有来源广泛、价格低廉、性能优良等特点,在众多工业领域发挥着关键作用,已经成为了现代工业中不可缺失的原材料之一。

2. 重质碳酸钙的生产工艺

2.1. 干法粉碎

原料选择:原料以石灰石、方解石、大理石等碳酸钙含量 $\geq 98\%$ 的高纯度矿石,通过筛选除去原矿中的杂质(铁磁性杂质、泥土或结块原料),以确保重质碳酸钙产品的品质和保护后续设备(如破碎机、磨机)免受金属损伤。

破碎:用破碎机将原矿初步破碎成较大块状,以便于后续打磨。粗破碎一般采用颚式破碎机,将矿石破碎至 30~50 mm 的块状物料。当原矿块度不大且磨粉机给料粒度较粗时,也可以使用一段锤式破碎机[1]。随后,将粗碎的原料投入反击式破碎机或圆锥破碎机二次破碎至 5~10 mm 的细颗粒。

细磨:将粗破碎后的矿石放入粉磨机进行细磨,将它们磨成细末。可以通过调整磨辊压力、转速、分级机叶片角度等参数控制成品细度也可通过多级研磨使颗粒细度降低。

分级:对细磨好的粉体进行分级处理,符合粒度要求的粉体可作为产品使用,不符合粒度要求的粉体会返回研磨机进行重新研磨,从而确保产品地品质及粒度的均匀性。

不同的研磨设备所生产的重钙产品粒度存在差异。干法工艺在生产粒径较大的重钙产品方面较为适用,如图 1 所示雷蒙磨可以生产出粒径为 38~74 μm 的重钙产品。如果在雷蒙磨的生产流程中加入干式微细分级机,那么能够生产出粒径分别为 10 μm 、18 μm 以及 25 μm 的重钙产品。超细研磨设备若与分级机相互配合,则能够组成超细加工工艺系统。相较于干法工艺,这种超细加工工艺系统(以下简称“超细加工工艺系统”)的投资成本更大、能耗更高,然而其优势在于可生产出细度小于 10 μm 的重钙产品,这类产品能够应用于塑料橡胶等行业作为高档填料。若采用另一种工艺,在其中加入高速机械冲击粉碎机,由于该粉碎机的单位功率粉碎能力较大,所以其能较为便捷地与干式微细分级机相配套,从而生产出粒径为 10 μm 的重钙产品。还有一种工艺所生产的超细重钙粉体产品中,有 35% 以上的颗粒细度小于 2 μm ,且这种工艺的电耗相对较低,运转费用也相对较少。

2.2. 湿法研磨

配料:是研磨前的关键过程,将碳酸钙、分散剂、水按一定比例配制成浆料,然后不断搅拌,使之分

散[2]。

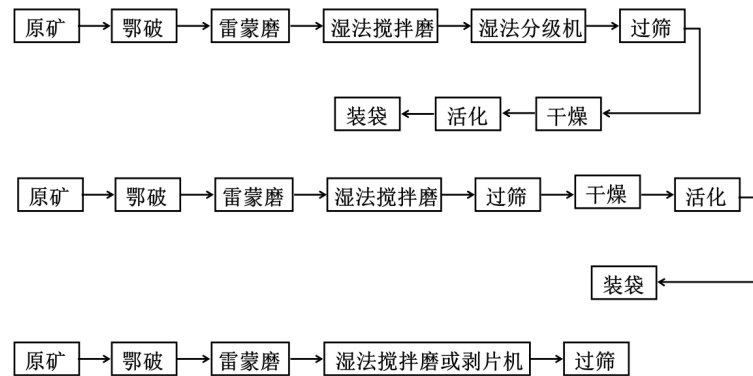


Figure 1. Process flow diagram of dry crushing of calcium carbonate
图 1. 碳酸钙干法粉碎的主要工艺流程图

超细研磨：目前使用设备主要有砂磨机(分为立式和卧式两种)、搅拌磨、球磨机等。如图 2 所示，其中使用最多的是卧式磨砂机，而超细立磨因其高效节能、产品质量好、环保、可规模化生产等优点在超细研磨中具有广泛的应用[3]。

分级：超细研磨完成后在出料时会经过分级设备，其中颗粒较大或有团聚现象的产物不能通过分级设备，会回到研磨设备中继续研磨[4]。

干燥：将分级后的产物烘干，使其水分含量符合产品要求。

湿法研磨通过多级研磨和精细分级，能够生产出粒度分布均匀的超细粉体且通过严格的分级和脱水工艺，产品纯度高，质量稳定，可满足不同工业应用的需求。但相比干法粉碎，湿法研磨工艺更加复杂，涉及多个步骤和设备，操作、维护和制备成本大大提高。

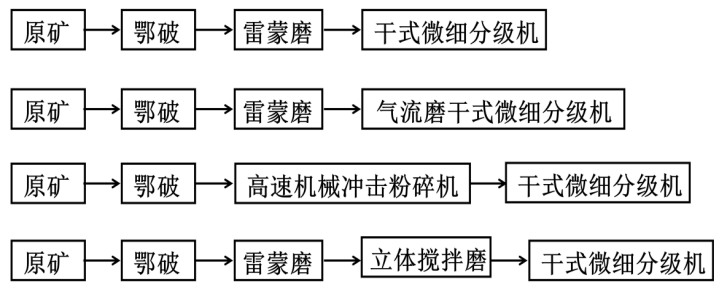


Figure 2. Process flow diagram of ultrafine grinding of calcium carbonate
图 2. 碳酸钙超细研磨的主要工艺流程图

3. 影响因素

在生产重质碳酸钙时，原材料、设备等因素都会对产品的品质造成影响。

3.1. 原料

原料的纯度直接影响重质碳酸钙的品质。高纯度的矿石可以生产出白度高，杂质少的产品。矿石中的杂质可能会在研磨过程中与其他物质发生反应，生成有色杂质，而高纯度矿石则能够有效避免这种情况，确保产品的色泽纯净。

3.2. 设备方面

(1) 破碎设备

破碎机的种类、性能会对矿石的粗破碎效果造成影响。需根据原料的硬度、粒度和生产目标,选择合适的破碎设备组合

颚式破碎机,适用于粗碎阶段,具有破碎比大、产品粒度均匀等特点。其性能参数(如颚板角度、进料口尺寸、偏心轴转速)会影响破碎效率和产品粒度。合理的颚板角度和进料口尺寸可以提高破碎机的处理能力和破碎效果。

锤式破碎机,适用于中碎和细碎,对于中等硬度以下的矿石破碎效果较好。其破碎机内部的锤头质量、转速和锤头排列方式等参数会直接影响产品的粒度分布和破碎效率。锤头质量大、转速高可以提高破碎效果,但同时也会增加设备的能耗和磨损。

圆锥破碎机,用于中碎和细碎,具有破碎效率高、产品粒度均匀的优点。其破碎机的主轴转速、偏心距和动锥与定锥的间隙等参数是影响破碎效果的关键因素。适当的主轴转速和偏心距可以提高破碎机的工作效率,而合适的间隙可以保证产品粒度的均匀性。

(2) 磨粉设备

磨粉机的种类和性质决定了产品的粒度分布及细度的大小。

雷蒙磨,适用于大规模生产中等细度的重质碳酸钙粉体。其结构紧凑、占地面积小,通过调整磨辊压力和分级机转速等参数可以控制产品的粒度分布和细度。磨辊压力越大,研磨效果越强,但同时也可能导致设备磨损加剧和能耗增加。

球磨机,可以生产出更细的粉体,通过研磨介质(如钢球)的滚动和跌落作用对物料进行研磨。球磨机的研磨效果较好,但通常需要较长的研磨时间和较高的能耗。其研磨介质的填充量、材质和球磨机的转速等参数会直接影响产品的粒度分布和细度。合适的填充量可以保证足够的研磨面积和作用力,而高质量的研磨介质能够提高研磨效率和产品质量。

环辊磨,研磨过程相对稳定,能够保证产品的粒度均匀性。环辊磨的工作原理是利用环辊与磨环之间的滚动摩擦进行研磨,其研磨压力、磨环间隙等参数是影响研磨效果的关键。适当的研磨压力和磨环间隙可以确保产品的粒度分布均匀,提高产品质量。

(3) 分级设备

在重质碳酸钙生产过程中,分级机是整个生产链中的核心设备,对产品质量和产量有着重要作用。在实际生产中,需要根据不同的生产粒度来选择合适的分级机。

3.3. 分散剂

分散剂的种类和加入量对浆料的粘度和流变性有重大影响。分散剂的加入量是由料浆中碳酸钙的固含量、产品细度、物料晶粒结构、分散剂、分散剂中有效成分含量、料浆的 pH 值以及研磨工艺而决定的[2]。

4. 重质碳酸钙的应用

4.1. 涂料领域

重质碳酸钙可以作为填充剂部分替代钛白粉等颜料,添加量一般在 10%~15%之间[5]。徐永华[3]等人通过大量实验得出,以白云石为原料制作的重质碳酸钙生产的聚酯涂料产品在对比率、漆膜白度等性能均优于以小方解石为原料制作重质碳酸钙生产的聚酯涂料。吴成宝[6]等人通过实验表明,将高白度重质碳酸钙粉作为体质颜料,可以提高涂料的白度,而粗细粉混合配制的涂料除白度相近外,其粘度较低、

遮盖性能和耐洗刷性较为单一。在地坪涂料中,徐永华[7]等人实验研究发现,小方解石为原料制备的重质碳酸钙在涂料中有着最好的稳定性,当碳酸钙的细度要求在 1250 目左右时,漆膜的各项指标最佳。在使用亚克力酯沥青防水的涂料中,马玉然[8]等人研究表明,当重质碳酸钙在产品的含量小于氯化聚乙烯在产品的含量时,添加的重质碳酸钙会提高涂料的拉伸强度和断裂伸长率,但会使涂料低温性能略有降低。在纳米材料中,王训道[9]等人通过实验表明,在涂料中加入纳米碳酸钙浆液后,涂料的耐水性、耐碱性、耐老化性都有明显的提高,当纳米碳酸钙浆体的添加量处于 3%~4%时,对涂料性能的提升最为显著,能有效增强涂料在不同环境下的稳定性和耐久性,满足各种场景的使用需求。

4.2. 橡胶领域

重质碳酸钙不仅能大量填充到橡胶中来降低制作成本,还可以增加橡胶制品的体积,同时具有补强、隔离、脱模、着色等功能[10]。加入重质碳酸钙可以提高橡胶的加工性能,使橡胶制品在加工过程中更易于保持外形。钟晨[11]等人在天然橡胶中适量添加微米级超细重质碳酸钙,因此优化了纳米级白炭黑在天然橡胶中的分散状况,让天然橡胶的拉伸强度得到了提高。王天强[12]等人采用硬脂酸钠、硅烷偶联剂对超细重质碳酸钙进行湿法改性后加入到硅橡胶中,改性后的重质碳酸钙在硅橡胶中有着更好的分散性,并且和硅橡胶构建了化学键,因此制造出来的 RTV 硅橡胶会具有更卓越的力学性能。

4.3. 造纸领域

在造纸过程中,因为重质碳酸钙可以作为填充剂大量加入,可以最大程度上节约成本,所以具有较高的经济效益。重要的是,碳酸钙颗粒会和纸张的纤维相结合,可以增强纸张的强度。由于阻留水分较少,滴水较好,降低纸张的吸湿性,而且不会产生沉积问题。重质碳酸钙填充后可以增强纸张的不透明度和亮度,还能使纸张变得更柔软[6]。

刘银[13]等人研究发现,将纳米包覆后的重质碳酸钙作为填料,可以提高纸张的抗张指数、填料留存率、抗破指数指数和抗折性。唐宏科[14]等人发现,将改性重质碳酸钙作为填充物,不仅可以提高填充物的留存率,而且能增强纸张的强度。纸张的力学性能也会随着重质碳酸钙的加入而发生变化。Mustafaiaekler [15]等人经大量力学性能研究后表明,以回收废纸生产的水松纸为原纸,采用重质碳酸钙制备的涂层进行涂布后的纸张抗张指数破指数均高于原纸。

将纳米碳酸钙作为填充物制作的生活用纸比普通的纸张有着更好的松密度,还具有良好的可塑性和柔软性,因此纸张表面也会变得更加细腻。因为重质碳酸钙的价格低廉,所以生产成本也会显著降低,从而为造纸企业带来显著的经济效益,帮助企业从市场竞争中脱颖而出[16]。

4.4. 塑料领域

将重质碳酸钙加入到塑料制品中时,硬度和刚度、成型性和稳定性、耐热性能均会有所提高,制造成本也会降低[6]。Webb [17]等人研究发现,碳酸钙在聚丙烯中的添加量在 0%到 40%时,塑料的断裂伸长率和屈服强度会减小,杨氏模量和弯曲模量会升高,因此,在机械性能变化满足要求的情况下,可以用碳酸钙部分代替塑料制品中的聚丙烯,从而达到降低生产成本的目的。

性能优越、质量可靠的研磨分级设备和工艺在以重质碳酸钙为原料的塑料工艺中有着重要的作用。其中欧版磨粉机由于具有高效节能、单机生产能力大、易于规模化生产、产品质量好等优点,成为了国家大力提倡的节能降耗新技术,将来会作为重质碳酸钙在塑料行业的主要研磨技术[18]。截至目前,重质碳酸钙凭借其独特的性能优势与经济价值,在以非金属为原料的塑料工艺领域中占据重要的地位。其卓越的物理化学性质,使其成为塑料生产中不可或缺的重要添加剂。在我国,重质碳酸钙在非金属材料中占有 80%的比重,可见在塑料工业中重质碳酸钙的前景非常广阔[19]。

4.5. 新兴产业领域

硬质碳酸钙作为一种重要的无机非金属材料,在新兴产业领域展现出广阔的应用前景。在新能源领域,硬质碳酸钙可用于太阳能电池板的表面处理材料[20]、光伏板材填料[21]以及新能源电池添加剂[22]等,有助于提升电池性能和降低成本。在生物医疗领域,其微纳结构可用于精准递送抗癌药物,具有良好的生物相容性和体内降解性,为肿瘤靶向治疗提供了新的途径[23]。在环保领域,硬质碳酸钙凭借其出色的吸附特性,可作为吸附剂和沉淀剂去除水中的有害物质,降低水体硬度,改善水质[24],同时在废气处理和土壤修复中也发挥着重要作用[25]。随着技术的不断进步,硬质碳酸钙在新兴产业中的应用将不断拓展和深化,为相关产业的发展提供重要支撑。

5. 重质碳酸钙的研究展望和发展趋势

目前,超细重质碳酸钙作为材料科学领域的重要研究对象,随着现代工业的发展,其应用领域不断扩展,超细重质碳酸钙的研究也逐渐深入。人们成功将这种材料的粒度控制在纳米级别,这一突破性进展使其性能和应用范围得到质的飞跃。纳米碳酸钙在多个工业场景中展现出卓越性能。橡胶制品通过添加这种材料获得更强的机械性能,塑料产品的光学特性和耐久性得到明显改善,造纸工业利用其优化纸张表面质量,涂料和油墨行业则受益于其优异的分散特性。这些应用效果有力推动了相关产业的技术升级。

随着重质碳酸钙的发展,其制备技术也在不断升级。间歇式碳化法通过精确控制反应条件,可稳定产出符合要求的纳米碳酸钙;超重力法则利用特殊设备创造的高强度反应环境大幅提升生产效率;非冷冻工艺的突破性在于摆脱低温条件限制,在常温下就能实现纳米级碳酸钙的制备。这些先进工艺产出的产品在粒径均匀性和表面特性上都远超传统产品,为涂料、造纸、橡胶、塑料等工业领域提供了更优质的选择。

人们通过对重质碳酸钙进行改性,提高了重质碳酸钙的界面相容性和分散性。界面相容性的提高,可以加强重质碳酸钙与其他材料之间的结合力,在复合材料体系中更好地发挥作用,避免因界面问题导致的性能缺陷[26]。而重质碳酸钙在材料中的分散性的改善,有助于重质碳酸钙在材料基体中均匀分布,减少团聚现象,提升了材料整体的稳定性和一致性。目前改性的方法多种多样。采用钛酸酯、铝酸酯、磷酸酯等干法表面改性技术时,选择合适的偶联剂可在提高性能的同时有效降低成本,对于纳米碳酸钙,常采用硬脂酸(盐)等湿法表面改性技术,在常温环境下保证质量的同时制备还能够降低成本[27]。郑桂兵[28]等人通过实验表明,使用经亚克力酸和亚克力苯乙烯共聚物改性后的重质碳酸钙,其表面亲水性变为亲油性,从而具有较好的表面疏水性,同时还具有分散和助磨作用。洪颖[29]等人研究发现,重质碳酸钙和环氧树脂通过干法改性相复合,能增强复合材料的塑性形变,增加材料的韧性,使其拉伸强度能达到 4.79 Mpa。

随着全球经济的发展和工业化进程的加快,建筑、塑料、造纸及新型产业对重质碳酸钙的需求将继续保持增长态势,未来重质碳酸钙生产商将日益丰富产品种类,满足多种需求。而技术创新始终是促进重质碳酸钙产业发展的关键因素。今后,人们将不断研究新的生产工艺和设备,使产品的质量和性能得到提高,生产成本也将随之降低。在发展中,重质碳酸钙会向功能化、专业化方向发展从而满足人们在不同应用领域的需求,人们会针对不同的应用领域,提供量身定制的产品与方案。在科技发展的人们的环保意识也在不断增强,重质碳酸钙产业也将在今后加强环境保护管理、减少污染物排放和提高资源利用效率。

6. 结语

重质碳酸钙作为一种重要的无机非金属材料,研究前景十分广阔,在现代工业中具有不可替代的地

位。本文综述了重质碳酸钙的制备、改性和应用研究进展。主要制备方法为干法粉碎和湿法研磨，表面改性技术显著提高了重质碳酸钙的应用性能。重质碳酸钙在涂料、橡胶、造纸、塑料等传统领域的应用不断深化，在新兴领域的应用也越来越广泛。

参考文献

- [1] 郑水林. 重质碳酸钙生产技术现状与趋势[J]. 无机盐工业, 2015, 47(5): 1-3+26.
- [2] 姬广斌, 柴晓利, 陈伟忠. 超细重质碳酸钙的应用及制备工艺[J]. 上海化工, 2000(11): 19-20+29.
- [3] 徐永华, 邹勇, 傅俊祥, 等. 不同重质碳酸钙在聚酯粉末涂料中的应用对比研究[J]. 涂料技术与文摘, 2017, 38(5): 41-44.
- [4] 王唯一. 湿法生产超细重质碳酸钙工艺实践[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2012(1): 36-37.
- [5] 秦广超, 杜仁忠, 黄云华. 国内超细重质碳酸钙生产的现状及其发展[J]. 中国粉体工业, 2006(4): 3-7.
- [6] 吴成宝, 盖国胜, 任晓玲, 杨玉芬, 赵夫涛. 不同品种重质碳酸钙粉在外墙涂料中的应用[J]. 中国粉体技术, 2011, 17(2): 16-19.
- [7] 徐永华, 温云祥, 刘建麒, 等. 不同重质碳酸钙在无机内墙涂料中的应用对比研究[J]. 涂层与防护, 2021, 42(8): 10-15.
- [8] 马玉然, 常英, 李文志, 刘金景, 段文锋, 李善法. 重质碳酸钙对丙烯酸酯乳液改性乳化沥青防水涂料性能的影响[J]. 中国建筑防水, 2015(4): 13-15.
- [9] 王训道, 蒋登高, 赵文莲, 周铭, 张东阳. 纳米碳酸钙在外墙涂料中的应用研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5): 547-552.
- [10] 马亚梦, 谭秀民, 张秀峰, 等. 我国重质碳酸钙产业现状及发展建议[J]. 矿产保护与利用, 2015(3): 71-75.
- [11] 钟晨, 肖毓秀, 甘明龙, 等. 湿法球磨超细重质碳酸钙在天然橡胶中的应用[J]. 云南化工, 2024, 51(11): 148-150.
- [12] 王天强, 刘旭, 王腾腾, 丁浩, 邹华, 王有治, 张立群. 超细重质碳酸钙表面改性及在硅橡胶中的应用研究[J]. 有机硅材料, 2018(6): 459-463.
- [13] 刘银, 吴燕, 杨玉芬, 盖国胜. 纳米包覆重质碳酸钙用作造纸填料的研究[J]. 中国造纸, 2013, 32(2): 16-21.
- [14] 唐宏科, 陈均志. 重钙的表面改性及在造纸中的应用[J]. 无机盐工业, 2000(5): 26-27+2.
- [15] Çiçekler, M., Üzümlü, V. and Çopurkuyu, E. (2023) Effects of Precipitated and Ground Calcium Carbonate Coating on Mechanical Properties of Fluting Paper. *Pigment & Resin Technology*, **53**, 541-548. <https://doi.org/10.1108/prt-08-2022-0102>
- [16] 张博, 吴桐, 赵富华, 刘军海. 纳米碳酸钙的制备及在造纸中的应用[J]. 天津造纸, 2010, 32(3): 19-21, 24.
- [17] Webb, C., Qi, K., Anguilano, L., et al. (2024) Mechanical and Environmental Evaluation of Ground Calcium Carbonate (CaCO₃) Filled Polypropylene Composites as a Sustainable Alternative to Virgin Polypropylene. *Results in Materials*, **22**, Article ID: 100562.
- [18] 李茂春, 刘程. 碳酸钙表面改性研究进展[J]. 聚氯乙烯, 2010, 38(8): 5-8.
- [19] 张强, 张高科. 重质碳酸钙在塑料工业中的应用[J]. 矿产保护与利用, 2000(4): 27-30.
- [20] Zheng, H., Song, C., Bao, C., Liu, X., Xuan, Y., Li, Y., et al. (2020) Dark Calcium Carbonate Particles for Simultaneous Full-Spectrum Solar Thermal Conversion and Large-Capacity Thermochemical Energy Storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **207**, Article ID: 110364. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110364>
- [21] Song, C., Liu, X., Xuan, Y., Zheng, H., Gao, K., Teng, L., et al. (2021) Granular Porous Calcium Carbonate Particles for Scalable and High-Performance Solar-Driven Thermochemical Heat Storage. *Science China Technological Sciences*, **64**, 2142-2152. <https://doi.org/10.1007/s11431-021-1854-4>
- [22] Ponrouch, A., Frontera, C., Bardé, F. and Palacin, M.R. (2015) Towards a Calcium-Based Rechargeable Battery. *Nature Materials*, **15**, 169-172. <https://doi.org/10.1038/nmat4462>
- [23] Zhou, X., Wang, Q., Lei, Z., Zhang, K., Zhen, S., Yao, H., et al. (2024) Calcium Carbonate-Based Nanoplatfoms for Cancer Therapeutics: Current State of Art and Future Breakthroughs. *ACS Omega*, **9**, 12539-12552. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09987>
- [24] Mallakpour, S., Tabesh, F. and Hussain, C.M. (2022) Water Decontamination Using CaCO₃ Nanostructure and Its Nanocomposites: Current Advances. *Polymer Bulletin*, **80**, 7201-7219. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04431-8>
- [25] Masindi, V., Foteinis, S., Renforth, P. and Chatzisymeon, E. (2023) Wastewater Treatment for Carbon Dioxide Removal.

-
- ACS Omega*, **8**, 40251-40259. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04231>
- [26] Chang, J., Yang, D., Lu, C., Shu, Z., Deng, S., Tan, L., *et al.* (2024) Application of Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) Process in Concrete Self-Healing and Environmental Restoration to Facilitate Carbon Neutrality: A Critical Review. *Environmental Science and Pollution Research*, **31**, 38083-38098. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33824-7>
- [27] 阳铁健, 颜鑫. 纳米碳酸钙表面改性技术研究进展[J]. 无机盐工业, 2012, 44(2): 9-12.
- [28] 郑桂兵, 杨秀云, 呼振峰. 超细重质碳酸钙表面改性的研究[J]. 矿冶, 2002, 11(3): 44-46.
- [29] 洪颖, 杨喆, 房佳慧, 等. 重质碳酸钙干法改性及其在环氧树脂中的应用[J]. 非金属矿, 2023, 46(1): 77-81.